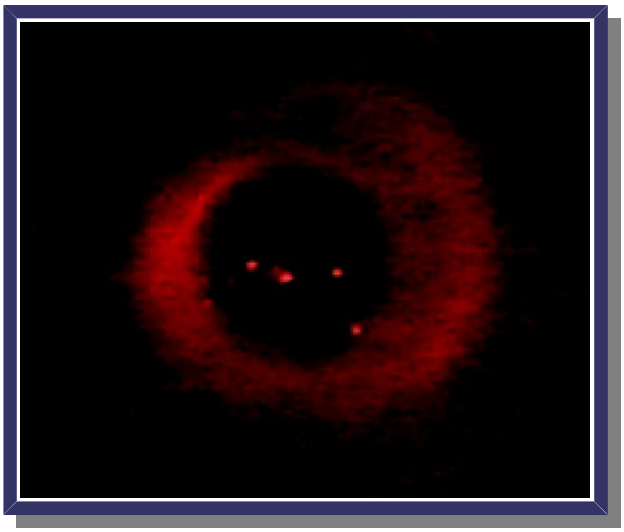
イオントラップ
実験手順書

Version 2011.10.17



http://www.nucl.phys.titech.ac.jp/iontrap

目次

1. イオントラップの原理と応用
2. 実験目的
3. 実験手順
4. 課題

東京工業大学大学院　理工学研究科
基礎物理学専攻　柴田研究室
本館 1-58 号室

助教：　中野　健一
TA：　小野　竜太

イオントラップの原理

イオン(荷電粒子)を空間中に固定する

イオンを空気中にトラップするためには電場や磁場を利用して、イオンに中心力を加える必要があります。

静電場を利用してどちらの方向からも斥力を加えることは可能だろうか？箱型の電極を作り、そこに帯電粒子と反対の極性の電圧を印加して、粒子を箱のなかに閉じ込めたら？

電磁気学で学んだように、導体でかこまれた空間の中には電場が生成されないから、この場合荷電粒子は電極から何の力も受けないことになる。それではどうすればいいだろうか？

イオントラップの歴史

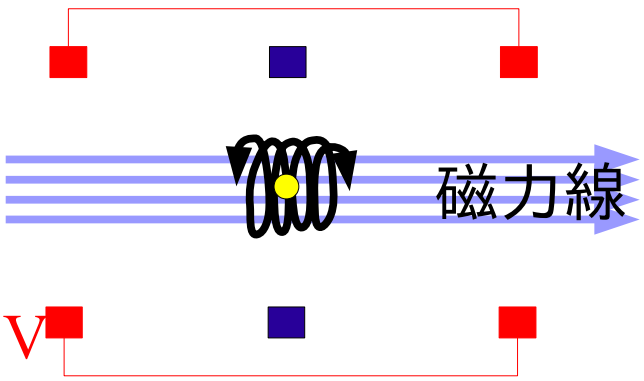
イオントラップは１９５３年にポールによって考案されました。その後レーザー冷却という技術を併用することにより、原子の量子的性質の精密測定が可能になりました。

この成果は１９８９年ノーベル物理学賞の対象テーマとして高い評価を受けました。

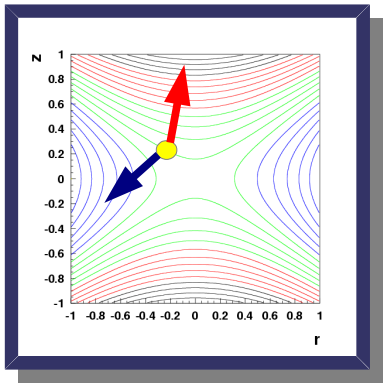
ペニングトラップ

ペニングトラップは静電場と静磁場を組合せ、荷電粒子を捕獲します。荷電粒子が磁場中を運動すると、磁力線から中心力を受け磁力線に巻き付くように動きます。

その性質をうまく利用したものがペニングトラップです。磁力線方向の閉じ込めは静電場により制御します。



ポールトラップ



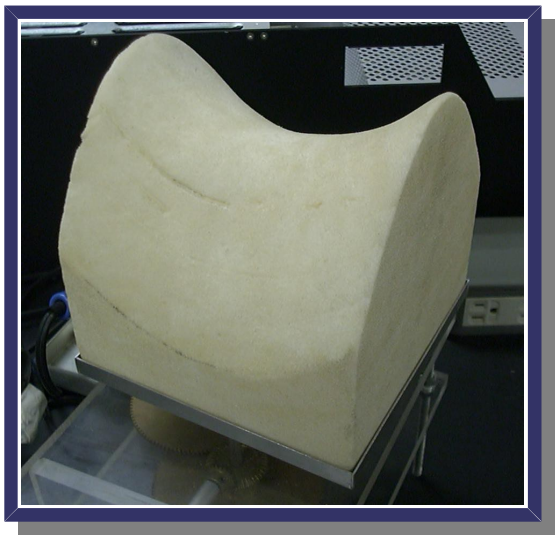
ポールトラップは電場のみを利用して荷電粒子を捕獲します。

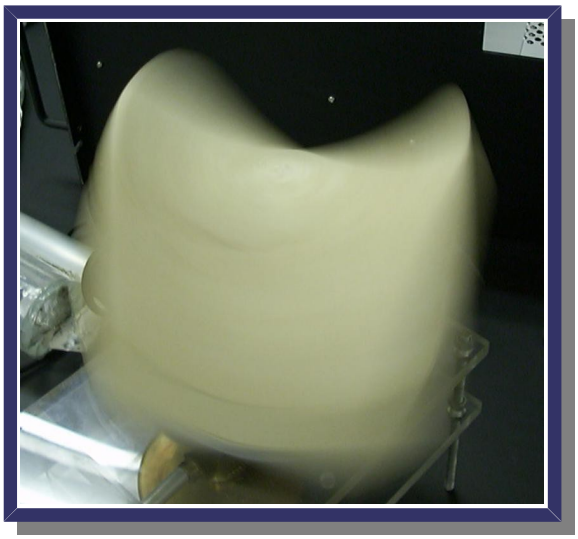
求心的な力を発生させるために回転双極子型の電極を用い、そこに振動電場を加えることで粒子を捕獲します。

今回の実験では、円筒型の電極を使用します。詳しい説明は参考資料にまかせ、簡単に今回の実験の場合を説明します。

円筒電極に印加し上下のキャップ電極を接地すると、右の図のような電位が形成されます。このようなポテンシャルは荷電粒子に対して、一方向の閉じ込め力のみを作ります。

円筒電極に正の電圧をかけた場合、負の電荷粒子は上下には閉じ込められますが、左右方向には外に向かった力を感じることになります。そこで交流電圧により極性を繰り返し変更することで、上下左右方向の閉じ込めを行ないます。





交流電位は回転電位に置き換えて考える事ができるます。

回転軸を上向きに取るとポテンシャル曲面は、上の写真にあるように上向きに回転軸、水平面内に上下左右方向が対応する鞍型のものになります。

電場が回転軸まわりに回転することはポテンシャルの平面図の回転にそのまま対応するので、その方向によって粒子は上下方向と左右方向の閉じ込め電場を交互に感じることになります。回転が十分に早い場合、右の写真にあるように粒子は上下、左右どちらにも閉じたような２次曲線型のポテンシャルに閉じ込められたようになります。

この様にして荷電粒子は振動電場(回転電場)の中に捕獲されます。

実験目的

イオントラップ実験の目的

イオントラップの応用

イオントラップは電荷粒子を空間中に固定するものですが、それは主に原子の性質測定の道具として使われています。

現在では「レーザー冷却」技術との併用で、原子一つ一つの量子的性質の詳細測定が行なわれています。また同時に冷却された原子のエネルギー状態間遷移による放射は、新世代の周波数標準器としても期待されています。

観測用の容器としてだけではなく、荷電粒子の捕獲・運搬にも使われています。ペニングトラップでは粒子は磁力線に巻き付くようにトラップされるので、電場をコントロールすることで磁力線に沿った方向の運動を制御できます。最近では陽電子と反陽子をイオントラップで捕獲し、その位置を制御してそれらの粒子を混ぜ合わせ、反水素の生成を行なう実験も行なわれました。

目的

今回の実験は数１０μm 程度の粒子を捕獲できるイオントラップ装置を用いて、実際に粒子を捕獲し、イオントラップの原理を学びます。

イオントラップ装置は組立式になっているので、自分で装置を組み立て、その構造、電気的特性等を理解します。またトラップされた粒子の電気的性質をイオントラップを使って測定してみます。

イオントラップ電極

今回の実験で使用するイオントラップ装置は、柴田研究室の卒業実験テーマとして製作されたものを基本につくられています。Paul 型のイオントラップを採用したことで、電場のみでのイオンのトラップが可能です。

特徴は電極に円筒電極を用いている事、霧程度の目で見える程度の大きさの粒子を捕獲することが可能であること、大気中での捕獲が可能であること、等があげられます。

実験手順

実験第１、２日目

イオントラップの組み立て、配線

トラップのテスト実験

実験第３、４日目

トラップされた粒子の比電荷測定

インジェクタ電圧と比電荷との関係測定

ディスカッション

実験装置の利用方法

各装置ごとに簡単な利用の手引きが用意されています。装置を使う時は最初に必ず手引きを読み、使う最中も間違いを起こさない様に随時参照して下さい。

時間に余裕があれば：

例えば

１：粒子への印加電圧と比電荷の関係

２：トラップ継続時間と比電荷との関係

３：キャップ電極の電圧・周波数が変化するとどうなるか？

等、いろいろテーマを考えてやってみましょう。

大きく条件を変更したい場合は、実験担当者もしくは TA に問い合わせてください。

実験第１、２日目

実験についての説明

イオントラップの原理と応用についての説明を聞く。なにか疑問があればどんどん質問しましょう。

実験準備

実験装置のセットアップ

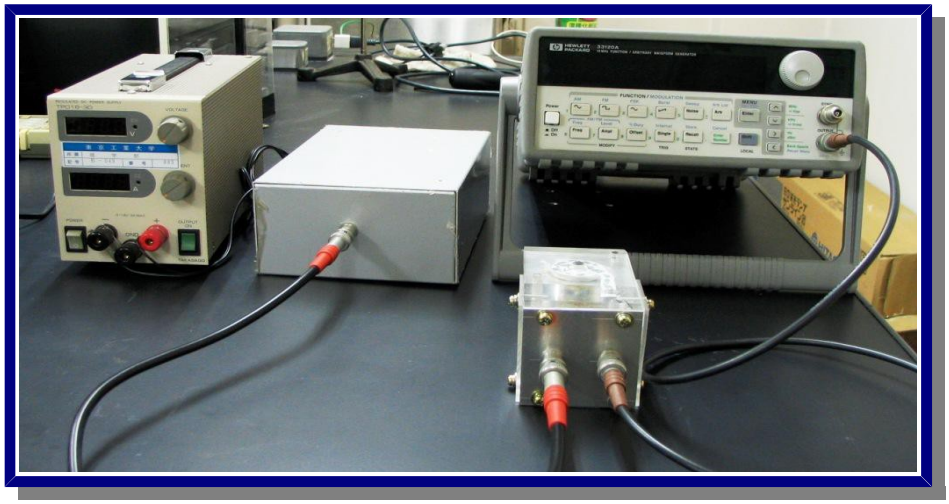
担当者や TA の指示に従いながら、実験機器の準備をすすめます。

イオントラップ電極装置の組み立て

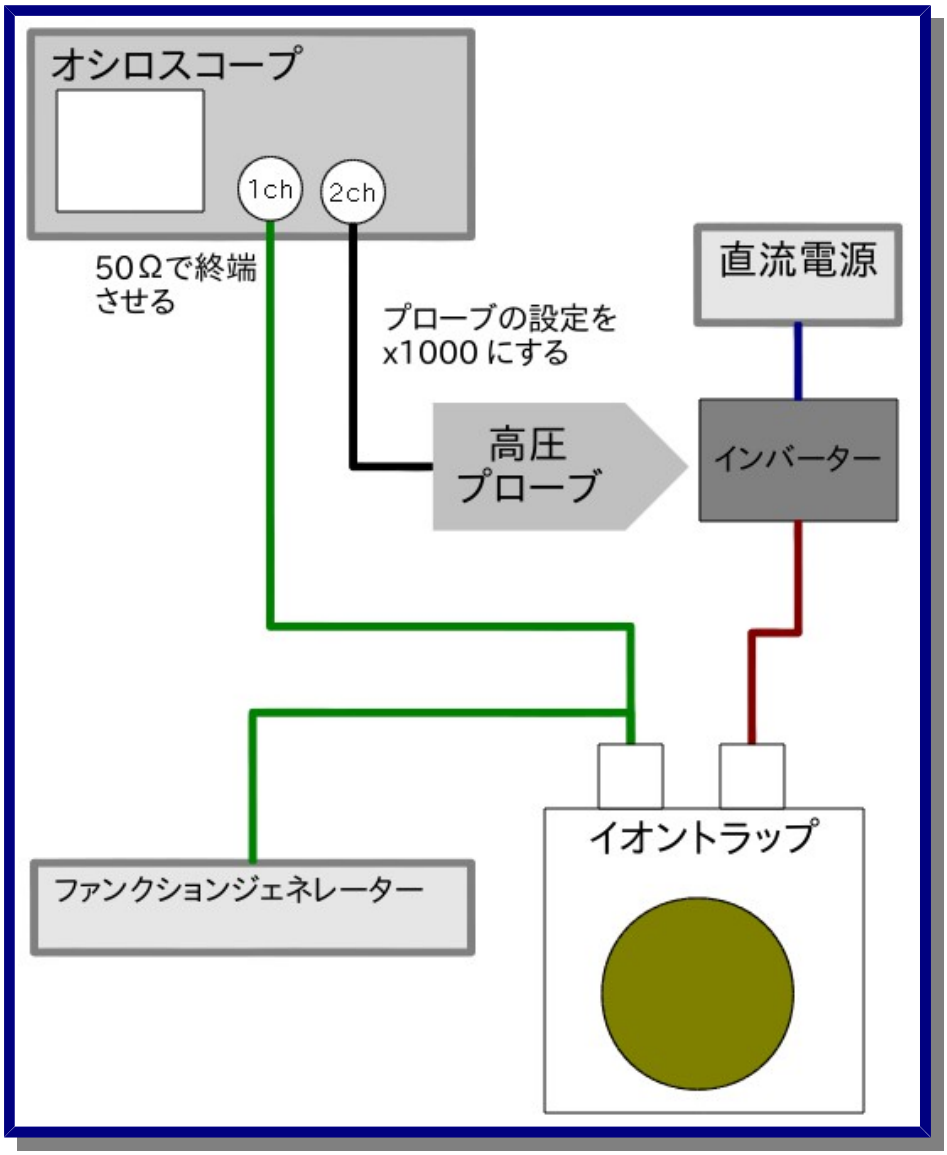
別紙「イオントラップ組立手順書」を参考にしながら電極装置をくみたてます。テスターやオシロスコープを利用して

1. 導通、絶縁の確認
2. それぞれの電極にどのような電圧がかかっているかの確認

を忘れないようにしてください。次の頁にある「トラップ電極電圧の測定」を必ず行なってください。



配線



図のように

1　直流電源→インバーター→イオントラップ

2　ファンクションジェネレーター→イオントラップ→オシロスコープ(1ch)

と配線する。オシロスコープ 1ch は入力インピーダンスが 50Ω になるように設定する。

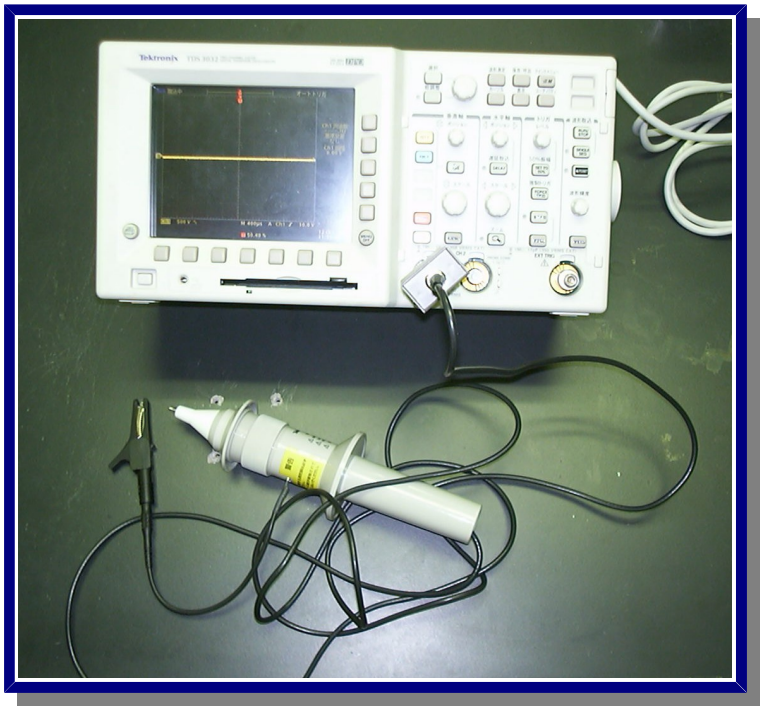
オシロスコープの 2 ch は高圧プローブ用に利用する。

高電圧の印加テスト

直流電源のスイッチをいれ、９Ｖになるまで徐々に電圧を上げていきます。パチパチと音がして、どこかで放電がおこっている場合はすぐに担当者に連絡してください。部屋を暗くすると、放電場所が分る場合もあるので確認してください。

電圧をあげていくにしたがって発振器からピーと音がするようになります。音が出ていて、直流電源の電流計が 0.2A 以下の場合は問題ありません。問題なければ一旦電源を０Ｖにもどします。

次にオシロスコープと高圧プローブを使って、実際に印加されている電圧の測定を行います。



トラップ電極電圧の測定

オシロスコープの準備

取扱説明書を見ながら、高圧プローブをオシロスコープに接続する。最初に高圧プローブのグランド端子（クリップになっている方）を接地すること。オシロスコープには複数の入力端子 (channel) が有り、ここでは ch. 2 を使う。

電源単体での測定

まずは高電圧発生装置から、イオントラップ装置と繋いでいるケーブルを外し、電源単体で測定する。異なる直流電源出力電圧でのインバーター出力電圧、周波数を測定する。

イオントラップ電極の電圧測定

つぎにイオントラップ装置と接続し、同様に測定を行う。

直流電源		高電圧出力装置単体出力		リング電極	
電圧(V)	電流(mA)	電圧(kVPP)	周波数(kHz)	電圧(kVPP)	周波数(kHz)
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					

テスト実験（イオンのトラップ）

電源等の設定値

ファンクションジェネレーター	５～１０ VPP	1 Hz
直流電源		V
対応する実測値	２５００Ｖ	Hz
インジェクション電圧		２５００Ｖ

イオントラップテスト

担当や TA の説明にしたがってトラップ装置、電源、エアブラシ、ビデオ等を準備する。印加テストが終ったら、上記設定値にあわせて帯電した微粒子をトラップする。

トラップ粒子が見えない場合

放電　放電音の確認。直流電源の電流値の確認(0.2mA 以下)

電極不良トラップ電極に電圧がかかっているか、測定してみる。
接触不良の場合もあるので、電圧を０Ｖにしてテスター等で導通、絶縁を確認する。

電源設定エアブラシに高電圧をかけ忘れている。
配線、電源の設定を確認する。

照明　照明の明るさが適当でない場合があります。LED の位置を調節し、粒子が最も見え易くなる条件をみつけてください。

等がある。どうしてもトラップ出来ない場合は担当に連絡すること。

テスト実験（トラップ粒子の運動制御）

ファンクションジェネレーターの設定を変化させ、トラップ粒子の運動がどのように変わるか観察する。トラップ可能な範囲を確認しておく。

ファンクションジェネレーター

振幅、発振周波数、波形 を変更できる。通常

振幅：　０.１ ～ １０ VPP

周波数：　０.５ ～ １０ Hz

波形：　正弦波

で測定を行うが、ここでは上記の範囲にとらわれず、いろいろ条件をかえてみて、それぞれの場合にどのようにトラップ粒子が振る舞うか観察する。

観察には LED 照明を使用して、全体の様子をみます。トラップ装置の中心部分、中心からはずれた部分で粒子がどのように運動しているか注意して観察しましょう。

トラップ電極電圧の依存性

ファンクションジェネレーター出力を １０ VPP、１ Hz の正弦波としておき、トラップ電極用直流電源の値を変化させ、トラップされた粒子の振舞を観察する。

インバーターへの入力電圧が９ V を越えないように。

３日目以降の比電荷測定では、外部からの変動電場中での粒子運動振幅の測定を行います。粒子が安定してトラップできる条件で、運動の振幅が大きい方が比電荷の測定が簡単になります。インバーターへの入力電圧を下げた状態で、ファンクションジェネレーターの周期・電圧等を変化させます。安定してトラップできる限界を確認しておくとよいでしょう。

以降の実験のために

続く実験を手順よくすすめるために、トラップできた条件を再現できるように記録しておく。

実験第 3、4 日目(比電荷測定)

外部電場に対するトラップ粒子運動の振幅測定

トラップされた粒子に外部電場を加えることで、粒子の運動をコントロール可能になる。粒子はその電荷に応じて力を受けるので、電場変化にたいする粒子運動を観測することで電荷情報が得られる。

実験手順

トラップ装置のセットアップ

実験第 1 日目でおこなったように装置の準備をすすめる。

インジェクション電圧は **2.5kV** とする。

トラップ粒子運動の振幅測定(ビデオ撮影)

粒子をトラップ出来たら、ファンクションジェネレーターの設定を

波形	正弦波	
電圧	0 ～ 10 VPP、	1VPP 間隔
周波数	0 ～ 1.5 Hz、	0.5Hz 間隔

の間で変化させ、粒子の運動の様子をビデオで録画する。同一粒子での測定が望ましい。画像撮影条件を整えたら、ビデオカメラの内部時計 (もしくはカウンタ) 等の情報を利用し、はじめに各条件での撮影を行い、後からまとめて解析するほうが効率がよい。測定条件を変えながら撮影し、条件とビデオのタイマー (カウント) を記録していく。

録画した映像から、粒子振幅を測定する。測定後速やかに電圧との依存関係を作図し、必要であれば測定を再度行う。（同じ周波数での再測定、異なる周波数での追加測定）

振幅測定記録表

測定日時：

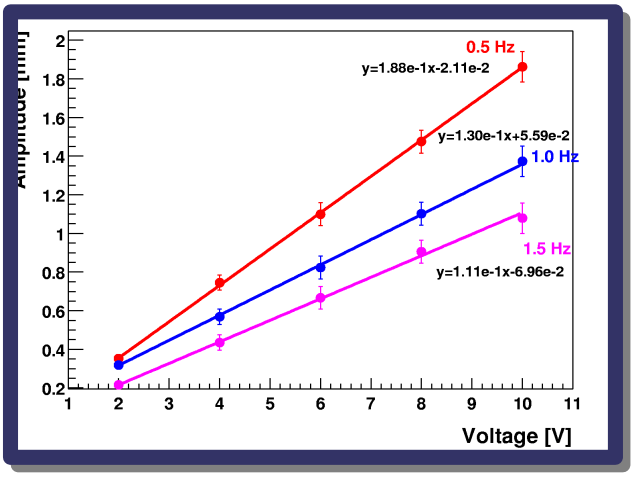
インジェクター電圧：

トラップ電極用直流電源電圧：

キャップ電圧		トラップ粒子運動 振幅
周波数(Hz)	電圧(VPP)	
0.5	0	
	2	
	4	
	6	
	8	
	10	
1.0	0	
	2	
	4	
	6	
	8	
	10	
1.5	0	
	2	
	4	
	6	
	8	
	10	

時間に余裕があれば、さらに周波数の範囲を広げて測定をしてください。

またトラップ電極用直流電源の電圧を調整して測定を繰り返してください。



比電荷の求め方

トラップ粒子運動と比電荷

外部からトラップ装置のキャップ電極に正弦波($v_0\cos\omega t$)を加えると、

$$m\frac{d^2z}{dt^2}=-k\frac{dz}{dt}-m\omega_z^2 z+\Gamma\left(\frac{ev_0}{zZ_0}\right)\cos\omega t$$

粒子には速度に比例する空気との摩擦力(第 1 項)とトラップ電場による力(第 2 項)と外部電場からの力が加わる。運動方程式はその組合せであたえられることになる。この運動方程式を解くと、粒子運動の振幅が

$$A=\frac{1}{\sqrt{\left(\omega_z^2-\omega^2\right)^2+\left(k\omega/m\right)^2}}\frac{e}{m}\frac{\Gamma v_0}{2z_0}$$

で求められる。

実験で比電荷を求めるためには、上記の振幅 A を外部電場の条件をいろいろ変えて計測し、その依存性を調べればよい。特に異なる振動数(ω)での振幅と外部電圧(v_0)との関係(比例計数)

$$g=\frac{dA}{dv_0}$$

を調べることで、比電荷(e/m)と粒子半径を導出できる(参考文献参照)。

振幅測定

上記より比電荷を求めるためには少なくとも異なる周波数で電圧と振幅のグラフをつくり、傾きを決定する必要がある。電圧と振幅が比例関係にあるとすると、最低 4 点の測定で比電荷が導出できることになるが、いろいろな条件での測定により測定誤差を押える。

解析をする上での注意

トラップ電圧振幅、周波数には測定値を使う。オシロスコープではピークとピークの差を測定することになるので、実際はその半分の値を使う。また式の中で与えられている周波数は角周波数である。実際は周波数を計っているだけなのでそこも注意する。

式中に値を代入する時は、その単位にも十分注意すること。

比電荷の求め方(補足)

より簡単な測定方法の検討

参考文献の式では

$$m\frac{d^2z}{dt^2}=-k\frac{dz}{dt}-m\omega_z^2 z+\Gamma\left(\frac{ev_0}{zZ_0}\right)\cos\omega t$$

の式を解くことになっている。これは空気抵抗とトラップポテンシャルと変動外部電場を全て含めた式になっている。これについては参考文献にあるように一般解が知られている。

極端な場合を考えてみよう。外部から正弦波ではなく、単純に電圧 v_0 がかけられているとしたらどのような事が予測されるであろうか。トラップされた粒子は角周波数 ω_z をもつばねで中心点まわりに捕獲されていると考えると、外部からかけられた電圧ですこし中心点からずれた場所に移動すると考えられる。

一般解から得られた粒子運動の振幅は

$$A=\frac{1}{\sqrt{\left(\omega_z^2-\omega^2\right)^2+\left(k\omega/m\right)^2}}\frac{e}{m}\frac{\Gamma v_0}{2z_0}$$

として与えられているが、上記のような場合には振幅はどのように書き表せるか？

実験では、いろいろな条件をうまくコントロールすることで、実験そのものを簡略化することが出来る。時間の短縮にもつながるし、むしろより正確な実験が可能な場合もある。

それでは、上記のような条件で測定を行い、比電荷を求めることは可能だろうか？

実験第３、４日目

応用実験テーマ

比電荷測定をさらに応用し、いろいろな事を試してみましょう。

鉄粉への印加電圧と比電荷の関係

食塩水が導体だとすると、電荷は印加電圧と関連づけられる。実際にはどうなっているだろうか？観測結果を元に考察してみよう。

比電荷とトラップ時間との関係

トラップ寿命はトラップ粒子とまわりの物質との間の電荷交換による、電荷の消滅にかかる時間によって決まるとすると、その長さは帯電量に依存していると思われる。実際はどうだろうか？

LED 照明で複数のトラップ粒子を観測できれば、時間とともに粒子数がどのように変化するか？

近似的な比電荷の測定

実験条件を限定して、測定と解析手順そのものを簡略化してみよう。

トラップ電圧の極限？

トラップ電圧の振幅は直流電源でコントロールできる。周波数を変化させるには高圧ケーブルの長さをかえる。

スタビリティダイアグラムはトラップ可能な範囲を与えるし、トラップ粒子の振幅もトラップ電圧に依存している。これをうまく利用し比電荷の測定に利用できないだろうか？

鉄粉にかける電圧を負圧にしたらどうなるか?

インジェクション電圧には正圧の電源を利用しています。これを負圧のものにとりかえたらどうなるでしょうか？正圧をかけたものと負圧をかけたものを同時にトラップ装置に入射したらどうなるか？

粒子の大きさの見積り

今トラップしている粒子の大きさを考えてみよう。

空気中での粒子の運動方程式は

$$m \cdot z'' = -mg - k \cdot z'$$

ここで m は質量、g は重力定数、k はストークスの法則から決り

$$k = \frac{6\pi\eta r}{1 + \frac{b}{pr}}$$

である(参考文献参照)。

粒子は一定速度で空気中を落下していくようにみえるので、その速度を v とすると、

$$\frac{k}{m} = \frac{g}{v}$$

m は粒子半径 r を使って求められるので、さらに式の変形をすすめると

$$r \sim 10^{-4} \times \sqrt{v} \ \text{[m]}$$

となる。(式変形は自分で確認してみてください)

もし空気中を v = 1 cm/s = 10^{-2} m/s で運動しているとすると、その粒子半径はおよそ 10^{-5} m = 10 μm 程度であろう。

粒子が完全導体であると仮定すると、その大きさが決まれば比電荷も予想できる。

$$\frac{Q}{m} = 3 \cdot \frac{\epsilon_0 V}{r^2 \rho}$$

なので、r=10 μm を代入してみると、

$$\frac{Q}{m} \sim 1 \left[C \cdot kg^{-1} \right]$$

程度の比電荷になる。